

Design and Performance Evaluation of a PWM-Controlled Vertical Pressure Filter for Solid–Liquid Separation of Nickel Laterite Slurry

Desain dan Evaluasi Kinerja Filter Tekanan Vertikal yang Dikendalikan PWM untuk Pemisahan Padat-Cair Bubur Nikel Laterit

Moh. Afandy
Prodi Teknik Listrik dan Instalasi
Politeknik Industri Logam Morowali
Morowali, Indonesia
Fandhymoh@gmail.com

Erick Aristya Perdana
Prodi Teknik Perawatan Mesin
Politeknik Industri Logam Morowali
Morowali, Indonesia
erick@pilm.ac.id

Isran Asnawi
Prodi Teknik Kimia Mineral
Politeknik Industri Logam Morowali
Morowali, Indonesia
isran@pilm.ac.id

Muhammad Ikbal Rianto
Prodi Teknik Listrik dan Instalasi
Politeknik Industri Logam Morowali
Morowali, Indonesia
Ikbal@pilm.ac.id

Hendi Lilih Wijayanto
Prodi Teknik Perawatan Mesin
Politeknik Industri Logam Morowali
Morowali, Indonesia
hendiw@gmail.com

Fathurrasuli
Prodi Teknik Perawatan Mesin
Politeknik Industri Logam Morowali
Morowali, Indonesia
Fatur@pilm.ac.id

Diterima : Januari 2026
Disetujui : Juli 2026
Dipublikasi : Juli 2026

Abstrak— Penelitian ini menyajikan hasil rancang bangun Vertical Pressure Filter berbasis Pulse Width Modulation (PWM) menggunakan aktuator linear untuk proses pemisahan slurry nikel laterit. Pengembangan sistem ini dilatarbelakangi oleh keterbatasan sistem filtrasi konvensional yang masih menggunakan tekanan tetap serta kurang fleksibel dalam pengaturan tekanan filtrasi. Metode penelitian yang digunakan adalah Design and Development (D&D), yang meliputi perancangan sistem mekanik dan elektronik, pengembangan rangkaian kendali PWM, realisasi prototipe, serta pengujian performansi sistem. Pengujian dilakukan pada variasi duty cycle PWM sebesar 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100% untuk mengevaluasi respons aktuator dan kinerja filtrasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan duty cycle PWM meningkatkan kecepatan aktuator dan tekanan vertikal pada ruang filtrasi. Rentang duty cycle 20%–40% memberikan respons aktuator yang lebih stabil dengan getaran yang rendah dan sesuai untuk proses filtrasi slurry nikel laterit. Selain itu, sistem mampu menghasilkan efisiensi filtrat sebesar 3,76% dan efisiensi residu sebesar 76,7%, yang menunjukkan kemampuan pembentukan filter cake dan penahanan padatan pada media filtrasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Vertical Pressure Filter berbasis PWM memiliki potensi sebagai sistem filtrasi yang adaptif, sederhana, dan fleksibel untuk aplikasi laboratorium maupun pilot plant pada pengolahan nikel laterit.

Kata kunci: Vertical Pressure Filter; Pulse Width Modulation; Filtrasi Padat–Cair; Slurry Nikel Laterit; Hidrometalurgi.

Abstract— This study presents the design results of a Vertical Pressure Filter based on Pulse Width Modulation (PWM) using a linear actuator for the separation process of nickel laterite slurry. The development of this system is motivated by the limitations of conventional filtration systems that still use fixed pressure and are less flexible in regulating filtration pressure. The research method used is Design and Development (D&D), which includes the

design of mechanical and electronic systems, development of PWM control circuits, prototype realization, and system performance testing. Tests were carried out on variations of PWM duty cycles of 20%, 40%, 60%, 80%, and 100% to evaluate the actuator response and filtration performance. The results show that increasing the PWM duty cycle increases the actuator speed and vertical pressure in the filtration chamber. The duty cycle range of 20%–40% provides a more stable actuator response with low vibration and is suitable for the nickel laterite slurry filtration process. In addition, the system was able to produce a filtrate efficiency of 3.76% and a residue efficiency of 76.7%, which indicates the ability to form a filter cake and retain solids in the filtration media. The results of the study indicate that the PWM-based Vertical Pressure Filter has the potential as an adaptive, simple, and flexible filtration system for laboratory and pilot plant applications in nickel laterite processing.

Keywords— Vertical Pressure Filter; Pulse Width Modulation; Solid–Liquid Filtration; Nickel Laterite Slurry; Hydrometallurgy.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan global terhadap sumber energi berkelanjutan terus meningkat seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi kendaraan listrik *Electric Vehicle* EV, sistem penyimpanan energi, dan berbagai perangkat elektronik yang berbasis baterai berkapasitas tinggi. Dalam rantai pasok material baterai, nikel khususnya dari bijih nikel laterit memegang peranan strategis sebagai bahan utama untuk pembuatan katoda baterai jenis NMC (*Nickel-Manganese-Cobalt*)[1]. Kondisi ini mendorong peningkatan signifikan terhadap kapasitas pengolahan nikel laterit melalui berbagai jalur *hydrometallurgy*, seperti *Atmospheric Leaching* (AL), *High Pressure Acid Leaching* (HPAL), serta metode *Advance*

Partial Leach (APAL) yang banyak diteliti beberapa tahun terakhir[2], [3].

Pada proses hidrometalurgi, tahapan *solid-liquid separation* merupakan salah satu tahap yang sangat menentukan keberhasilan proses ekstraksi [4]. *Slurry* hasil pelindian terdiri atas campuran larutan pelarut (filtrat) dan residu padatan halus dengan tingkat keasaman tinggi serta karakteristik reologi yang kompleks [5]. Kinerja pemisahan filtrat dan residu akan memengaruhi konsentrasi logam terlarut, efisiensi tahap pemurnian berikutnya, serta konsumsi energi dan bahan kimia secara keseluruhan. Oleh karena itu, sistem filtrasi yang efektif menjadi salah satu komponen penting dalam optimasi proses pengolahan nikel laterit [6].

Berbagai teknologi pemisahan padat-cair telah diterapkan baik pada skala laboratorium maupun industri, antara lain *gravity filter*, *plate and frame filter press*, *pressure filter*, *vacuum filter*, *batch leaf filter*, *rotary vacuum filter*, dan *centrifugal filter* [7]. Akan tetapi, penerapan teknologi tersebut pada *slurry* nikel laterit masih menghadapi beberapa kendala. Ukuran partikel yang sangat halus serta viskositas *slurry* yang relatif tinggi menyebabkan laju filtrasi menjadi rendah dan sering terbentuk lapisan cake yang padat sehingga menghambat aliran filtrat [8]. Selain itu, sistem *plate and frame filter press* umumnya membutuhkan mekanisme hidrolik yang kompleks, waktu operasi yang relatif lama, biaya investasi yang tinggi, serta kesulitan dalam melakukan pengaturan tekanan filtrasi secara dinamis selama proses berlangsung [9].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengembangkan *Vertical Pressure Filter* untuk meningkatkan efisiensi pemisahan *slurry* nikel laterit melalui penerapan gaya tekan vertikal. Sistem ini terbukti mampu menghasilkan distribusi tekanan yang lebih merata dibandingkan sistem filtrasi konvensional sehingga dapat meningkatkan laju filtrasi dan efisiensi pemisahan [17]. Namun demikian, sebagian besar sistem *Vertical Pressure Filter* yang telah dikembangkan masih menggunakan mekanisme tekanan hidrolik atau tekanan tetap (*constant pressure*). Sistem hidrolik memiliki beberapa keterbatasan, antara lain konstruksi yang lebih kompleks, kebutuhan perawatan yang tinggi, potensi kebocoran fluida, serta keterbatasan dalam melakukan variasi tekanan secara cepat dan presisi selama proses filtrasi berlangsung. Selain itu, pengaturan tekanan secara real-time untuk menyesuaikan karakteristik *slurry* belum banyak dilakukan pada penelitian sebelumnya. [10].

Untuk meningkatkan kinerja sistem ini, penggunaan aktuator linear yang dikendalikan dengan teknik *Pulse Width Modulation* (PWM) menjadi inovasi kunci dalam penelitian ini[11]. PWM merupakan metode pengendalian yang memanfaatkan variasi lebar pulsa untuk mengatur besar kecilnya daya yang dikirimkan ke aktuator, sehingga menghasilkan kontrol tekanan yang lebih presisi, responsif, dan hemat energi [12], [13]. Berbeda dengan sistem tekanan konvensional yang bekerja dalam mode on/off atau dengan tekanan tetap, pengontrolan PWM memungkinkan tekanan filtrasi dimodulasi secara kontinyu dan adaptif sesuai karakteristik *Slurry*[14], [15], [16].

Berdasarkan telaah tersebut, terdapat *research gap* yang perlu dikaji lebih lanjut, yaitu belum tersedianya sistem *Vertical Pressure Filter* berbasis aktuator linear yang mampu menghasilkan tekanan filtrasi secara adaptif dan dikendalikan secara digital menggunakan metode *Pulse Width Modulation*

(PWM). Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan sistem tekanan tetap, pendekatan berbasis PWM memungkinkan pengaturan tekanan secara kontinu dengan tingkat presisi yang lebih tinggi, respons yang lebih cepat, serta konsumsi energi yang lebih rendah.

Novelty penelitian ini terletak pada pengembangan *Vertical Pressure Filter* berbasis aktuator linear dengan pengendalian PWM yang mampu menghasilkan tekanan filtrasi secara presisi, adaptif, dan hemat energi untuk pemisahan *slurry* nikel laterit. Sistem yang dikembangkan tidak lagi menggunakan mekanisme hidrolik sebagaimana penelitian sebelumnya, tetapi memanfaatkan aktuator linear yang dikendalikan secara digital sehingga lebih sederhana, mudah dioperasikan, dan sesuai untuk aplikasi laboratorium maupun *pilot plant*.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, membangun, dan mengevaluasi kinerja *Vertical Pressure Filter* berbasis PWM berdasarkan respons aktuator, tekanan filtrasi yang dihasilkan, waktu filtrasi, volume filtrat, efisiensi pemisahan, dan kadar kelembaban residu pada *slurry* nikel laterit. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi filtrasi adaptif berbasis kendali digital untuk mendukung proses pengolahan mineral laterit yang lebih efisien, ekonomis, dan berkelanjutan.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Design and Development* (D&D) yang dilanjutkan dengan evaluasi performansi sistem. Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada perancangan, pembangunan, dan pengujian prototipe *Vertical Pressure Filter* berbasis aktuator linear yang dikendalikan menggunakan teknik *Pulse Width Modulation* (PWM). Sistem dirancang untuk menghasilkan tekanan filtrasi yang stabil, adaptif, dan dapat dikendalikan secara presisi selama proses pemisahan *slurry* nikel laterit.

Tahapan penelitian meliputi: (1) identifikasi kebutuhan sistem, (2) perancangan mekanik dan elektronik, (3) pengembangan topologi rangkaian PWM dan sistem pembalik arah aktuator, (4) realisasi prototipe, (5) pengujian performansi filtrasi, serta (6) analisis data dan evaluasi hasil.

A. Perancangan Sistem

Tahap perancangan sistem diawali dengan analisis kebutuhan fungsional *vertical pressure filter*, meliputi kebutuhan torsi awal, kestabilan putaran rotor, kemampuan pembalikan arah putaran (*forward–reverse control*), dan kestabilan daya ketika proses pemerasan berlangsung.

Berdasarkan analisis tersebut maka sistem Sistem *Vertical Pressure Filter* didesain menjadi tiga subsistem utama, yaitu:

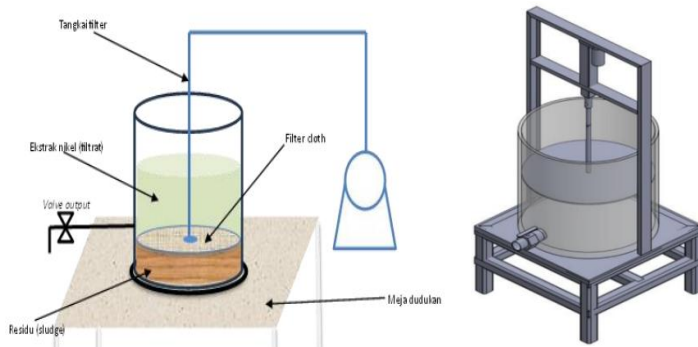
- Subsistem kendali PWM berbasis motor driver.
- Subsistem aktuator linear dan pensaklaran dua arah (*forward-reverse switching*).
- Subsistem mekanik filtrasi.

Dari hasil perancangan mekanik diperoleh data kebutuhan perancangan antara lain :

- Tabung filtrasi menggunakan akrilik dengan ketebalan 5 mm dengan diameter tabung 10,5 cm dan tinggi tabung 18,5 cm. Sedangkan pada bagian atas

tabung digunakan filter cloth dengan ukuran pori 450 mesh.

2. Rangka utama menggunakan besi holo ukuran 2,5 x 2,5 cm
3. Rangka meja menggunakan besi siku dengan ukuran 3,8 x 3,8 cm.
4. Ukuran meja 60 x 60 cm dengan ketebalan besi 2mm.
5. Pada bagian actuator menggunakan verital pressure actuator dengan tegangan kerja 24 vdc, dengan torsi sebesar 1000 N. Panjang awal actuator 32 cm dan jarak pressure 20 cm.
6. Ketinggian tiang penyangga 53,5cm dengan lebar tiang penyangga 25 cm yang dapat bergeser 180°.



Gambar 1. Perancangan isometri alat dan desain manual vertical pressure filter

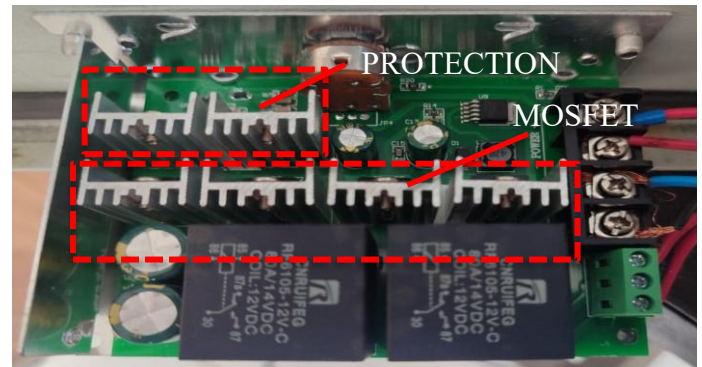
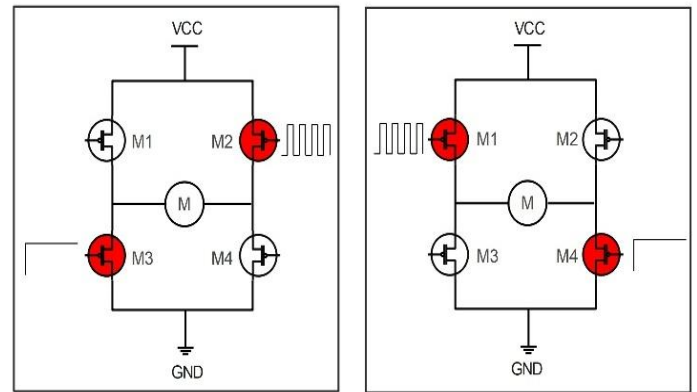
B. Topology Rangkaian Kendali

Topology rangkaian dikembangkan untuk memastikan integrasi yang aman antara motor driver PWM dan sistem kontaktor atau pensaklaran. Rangkaian terdiri dari beberapa komponen utama: modul kontrol PWM dengan menggunakan IC 555 sebagai penghasil sinyal osilator, rangkaian proteksi arus, kontaktor elektromagnetik dengan interlock mekanis.

Topology kontrol arah dua putaran (*bi-directional control*) menggunakan dua kontaktor yang disusun dalam konfigurasi *forward-reverse interlocking* untuk mencegah hubungan singkat antar fasa atau perubahan arah mendadak. Motor driver PWM digunakan untuk mengatur frekuensi durasi pulsa sehingga kecepatan motor dapat dikendalikan secara presisi tanpa kehilangan torsi yang signifikan.

Rangkaian kontrol dirancang dengan mempertimbangkan isolasi dan keselamatan (menggunakan *optocoupler* atau *isolated gate driver* untuk modul PWM), keandalan switching kontaktor, kemampuan modul PWM menangani arus puncak saat beban filtrasi berada pada tekanan maksimum, dan *Fail-safe mechanism* untuk mencegah kegagalan sistem selama proses filtrasi.

Pada Sistem driver juga dilengkapi dengan flyback diode pada masing-masing terminal MOSFET untuk melindungi rangkaian dari tegangan balik atau back-EMF yang dihasilkan oleh actuator saat berhenti mendadak atau saat beban berubah secara dinamis. Hal ini penting mengingat actuator bekerja dalam lingkungan viskos dimana larutan asam dengan ore yang memiliki kemungkinan fluktuasi beban mekanik, yang berpotensi menimbulkan lonjakan tegangan balik.



Gambar 2. Topology Rangkaian Driver Motor

C. Kendali Pulse Width Modulation (PWM)

Pengontrolan lebar pulse digunakan sebagai control utama dalam pengaturan frekuensi *Dutycycle*. Besaran kerja gelombang dengan amplitude disesuaikan dengan kebutuhan amplitude tegangan motor DC yang digunakan. Penentuan frekuensi gelombang PWM pada kondisi 0% hingga mencapai kondisi 100% dapat dijelaskan berdasarkan persamaan berikut.

$$T_{total} = T_{on} + T_{off} \quad (1)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_{total}} \quad (2)$$

$$V_{out} = D \times V_{in} \quad (3)$$

$$V_{out} = \frac{T_{on}}{T_{total}} \times V_{in} \quad (4)$$

Dimana :

D = *Dutycycle* adalah lamanya pulsa high dalam satu perioda.

T_{on} = Waktu Pulsa "High".

T_{off} = Waktu Pulsa "Low".

D. Pengujian Alat

Pada tahapan awal pengujian, dilakukan proses persiapan sample hasil ekstraksi yang diperoleh dari tahapan sebelumnya. Untuk memperoleh hasil yang dapat dibandingkan secara objektif, seluruh pengujian dilakukan dengan kondisi slurry yang tetap. Nilai m_0 ditentukan dengan pengambilan sampel awal sebelum dilakukannya filtrasi sebanyak 100 mL. Kemudian nilai m_t yang digunakan juga sebanyak 100 mL. Masa residu awal atau m_{r0} merupakan massa padatan ore yang terkandung dalam sampel dan selanjutnya untuk m_{rt} merupakan massa padatan setelah dilakukannya proses filtrasi. Untuk

menghitung nilai efisiensi tersebut, digunakan persamaan matetatis berikut.

$$\mathcal{E}_{filtrat} = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100 \quad (5)$$

$$\mathcal{E}_{residu} = \frac{m_{rt}}{m_{r0}} \times 100 \quad (6)$$

Dimana :

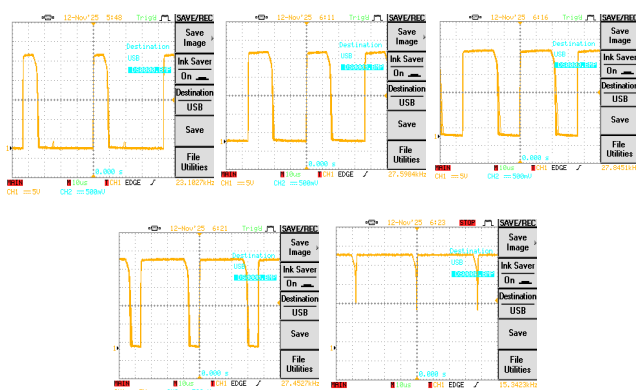
$\mathcal{E}_{filtrat}$ = efisiensi filtrate (%)
 $\mathcal{E}_{residu}$ = efisiensi residu (%)
 m_0 = massa filtrate awal (gram)
 m_t = massa filtrate akhir (gram)
 m_{r0} = massa residu awal (gram)
 m_{rt} = massa residu akhir (gram)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kinerja Sistem Kendali PWM terhadap Aktuator Vertikal Pressure Filter

Pengujian awal dilakukan untuk mengevaluasi respons aktuator terhadap variasi sinyal PWM yang dihasilkan oleh rangkaian driver. Variabel yang diuji meliputi *duty cycle* (20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%), arah aktuator, serta kestabilan tekanan aktuator saat sistem bekerja dengan beban *Slurry*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan *duty cycle* berbanding lurus dengan kenaikan kecepatan aktuator penekan dan tekanan vertikal yang dihasilkan pada ruang filtrasi. Pada rentang < 20–40 % *duty cycle*, aktuator menghasilkan tekanan yang cukup stabil dan respons mekanis yang optimum untuk proses pemerasan *Slurry* nikel laterit.

Stabilitas aktuator selama operasi juga menunjukkan peran penting dari penggunaan sistem *driver* dan rangkaian kontaktor interlock. Pada *duty cycle* rendah (20–40%), aktuator bekerja dengan getaran minimal dan torsi rendah, sehingga sesuai untuk tahap awal proses filtrasi. Namun, pada *duty cycle* di atas 40%, terdeteksi kenaikan tekanan yang signifikan akibat peningkatan beban kompresi. Pada Gambar 3 terlihat sinyal pengaturan *duty cycle* yang dilakukan.



Gambar 3. Pengaturan *Duty cycle* 20-100%

Kinerja kendali dua arah (*forward–reverse*) juga diuji untuk memastikan bahwa sistem mampu mengakomodasi operasi pembukaan dan penutupan ruang filtrasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perpindahan arah dapat dilakukan dengan cepat dan aman karena interlock pada

kontaktor memastikan kedua mode tidak aktif secara bersamaan.

Tabel 1. Durasi waktu terhadap PWM saat melepas tekanan dan menekan turun

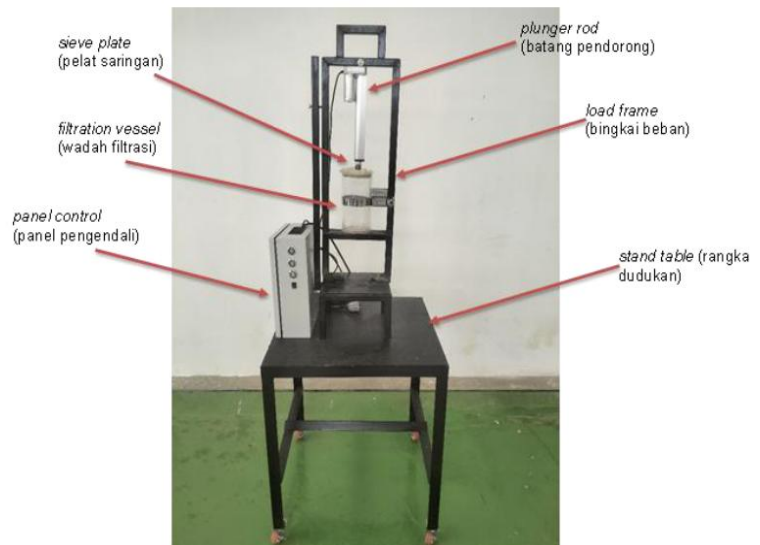
Melepas Tekanan			Menekan turun		
NO.	Duty Cycle (%)	Waktu	NO.	Duty Cycle (%)	Waktu
2.	20%	3;17	2.	20%	4;00
4.	40%	1;28	4.	40%	2;11
6.	60%	1;00	6.	60%	2;23
8.	80%	0;42	8.	80%	2;05
10.	100%	0;33	10.	100%	1;15

Dalam pengujian berikut terdapat selisih waktu yang dibutuhkan untuk aktuator saat bergerak turun dan naik. Perbedaan selisih waktu diperoleh dengan kondisi *duty cycle* yang sama. Kecenderungan untuk menekan turun jauh lebih lama waktu yang dibutuhkan aktuator dari titik awal hingga mencapai titik akhir pressure. Kondisi perbedaan durasi naik dan turun terjadi dikarenakan perpindahan polaritas tegangan pada *actuator* penggerak yang berfungsi sebagai penekan.

B. Evaluasi Kinerja Mekanis Vertical Pressure Filter

Evaluasi dilanjutkan dengan menganalisis kinerja mekanis dari sistem *vertical pressure filter* saat menerima tekanan dari aktuator. Parameter yang diuji yaitu stabilitas tekanan vertical, kecepatan pemadatan *Slurry*, tingkat getaran mekanis, Konsistensi pergerakan slider atau screw press.

Pada *duty cycle* optimum (< 20–40%), mekanisme penekan menunjukkan kemampuan menghasilkan tekanan yang konsisten.

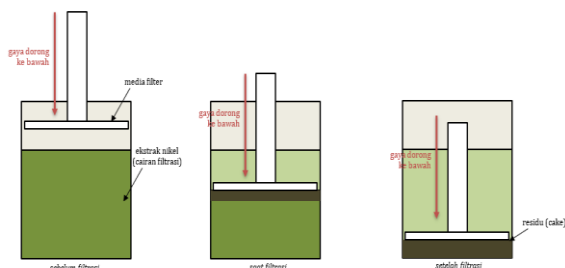


Gambar 4 Struktur Vertical Pressure Filter

Gambar 4. Memperlihatkan tentang Struktur vertikal diduga memberikan distribusi tekanan yang lebih merata pada sumbu filtrasi. Hal ini meningkatkan proses pemisahan air dari padatan karena tekanan lebih fokus pada sumbu vertikal, menghasilkan aliran filtrat yang lebih terarah dan cepat. Akan tetapi saat kecepatan dinaikkan, maka hasil filtrasi yang diperoleh cenderung menurun. Hal ini dipengaruhi oleh besarnya tekanan pada ruang filtrasi

sehingga penyaring pemisah padatan dan larutan tidak dapat berfungsi maksimal.

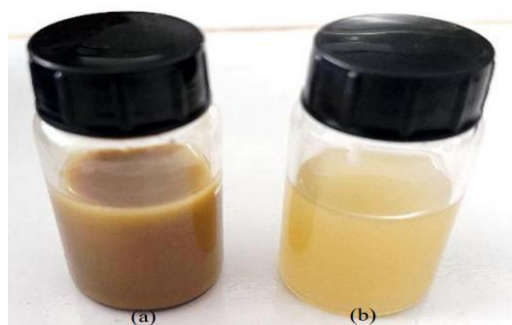
Alat vertical pressure filter bekerja dengan menggabungkan prinsip pressure filter dan gravity filter dengan bantuan tekanan eksternal (*pressure*) dari pompa hidrolik yang bekerja secara vertikal dari atas ke bawah (*gravity*). Saat proses filtrasi berlangsung, media filter bergerak dari atas ke bawah dan berinteraksi dengan padatan yang ada di dalam cairan. Proses ini menghasilkan tekanan yang mendorong cairan melewati filter, sementara residu tertahan di bagian bawah vessel [17], [18]. Ilustrasi proses filtrasi menggunakan alat vertical pressure filter dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Ilustrasi proses filtrasi dengan alat vertical pressure filter [18]

C. Performa Proses Filtrasi

Untuk menilai performa filtrasi, dilakukan pengujian menggunakan cairan ekstrak nikel dengan konsentrasi padatan 1%. Parameter yang diamati yaitu efisiensi filtrasi dan efisiensi residu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem vertical pressure filter berbasis PWM mampu melakukan proses pemisahan dengan waktu yang lebih singkat dibandingkan metode filtrasi konvensional skala laboratorium. Berdasarkan hasil pengujian filtrasi pada tabel 2, diperlihatkan bahwa nilai % efisiensi filtrat yang relatif rendah, yaitu berkisar 3,76% menunjukkan bahwa alat vertical pressure filter berbasis hidrolik mampu menahan sebagian besar padatan, walaupun filtrat yang dihasilkan masih mengandung partikel halus atau partikel koloid yang lolos melalui pori-pori media penyaring. Kondisi ini umum terjadi pada filtrasi cairan ekstrak nikel karena adanya fraksi partikel sangat halus yang sulit dipisahkan menggunakan metode filtrasi konvensional. Di sisi lain, tingginya nilai % efisiensi residu mengindikasikan bahwa alat vertical pressure filter mampu membentuk lapisan filter cake secara efektif, sehingga sebagian besar padatan tetap tertahan pada permukaan media filter [18][19].



Gambar 5. Hasil Sampel setelah dilakukan pemisahan.
a. Sampel awal b. Hasil Pemisahan

Tabel 2. Hasil pengujian filtrasi

NO.	Parameter	Nilai
1.	Efisiensi filtrat (%)	3.76
2.	Efisiensi Residu (%)	76.7

D. Perbandingan dengan Sistem Filtrasi Konvensional

Berdasarkan hasil pengujian, beberapa keunggulan utama sistem vertical pressure filter berbasis PWM dibandingkan sistem filtrasi konvensional tanpa pengaturan kecepatan yaitu :

1. Tekanan yang dapat diatur (*variable pressure*) PWM memungkinkan pengaturan tekanan bertahap sehingga proses filtrasi berlangsung lebih efisien.
2. Waktu filtrasi lebih singkat
Penggunaan aktuator bertekanan variabel memberikan percepatan proses pemadatan *Slurry*.
3. Efisiensi pemisahan lebih tinggi
Filtrat lebih jernih dan residu lebih padat dibandingkan metode gravitasi dan plate filter tanpa kendali tekanan.
4. Penggunaan energi lebih terkontrol
PWM memungkinkan motor bekerja hanya pada kebutuhan tekanan tertentu, mengurangi konsumsi energi.
5. Perawatan mudah dan biaya rendah
Berbeda dengan sistem hidrolik, aktuator bermotor dengan kontrol PWM lebih sederhana, tidak membutuhkan fluida hidrolik, dan biaya operasional lebih ringan.
6. Arah gerakan dapat dikontrol secara fleksibel
Kendali forward–reverse membantu proses pembukaan dan pembersihan filter secara lebih efektif.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang dan membangun sistem Vertical Pressure Filter berbasis kendali Pulse Width Modulation (PWM) untuk proses pemisahan slurry nikel laterit. Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi duty cycle PWM berpengaruh terhadap respons aktuator linear, dimana peningkatan duty cycle menghasilkan peningkatan kecepatan aktuator dan tekanan vertikal pada ruang filtrasi. Sistem kendali dua arah (*forward-reverse*) berbasis kontaktor juga mampu bekerja dengan baik untuk mengatur proses penekanan dan pelepasan tekanan secara aman dan stabil. Dari sisi mekanis, struktur Vertical Pressure Filter yang dikembangkan mampu memberikan distribusi tekanan yang relatif merata pada media filtrasi sehingga proses pembentukan filter cake dapat berlangsung secara baik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rentang duty cycle 20%–40% memberikan respons aktuator yang lebih stabil dengan getaran yang rendah, sehingga sesuai untuk proses filtrasi slurry nikel laterit. Pada pengujian performa filtrasi menggunakan larutan ekstrak nikel, sistem mampu menghasilkan efisiensi filtrat sebesar 3,76% dan efisiensi residu sebesar 76,7%. Nilai efisiensi residu yang relatif tinggi menunjukkan bahwa sebagian besar padatan berhasil tertahan pada media filter dan membentuk filter cake yang cukup baik. Namun demikian, filtrat yang dihasilkan masih mengandung partikel halus yang lolos melalui media penyaring, sehingga diperlukan optimasi lebih lanjut pada ukuran pori media

filter, tekanan filtrasi, dan karakteristik slurry untuk meningkatkan kualitas filtrat yang dihasilkan. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan aktuator linear berbasis PWM pada Vertical Pressure Filter dapat menjadi alternatif sistem filtrasi yang lebih sederhana, mudah dikendalikan, dan memiliki fleksibilitas pengaturan tekanan dibandingkan sistem filtrasi konvensional berbasis tekanan tetap. Pengembangan lebih lanjut dengan optimasi parameter operasi dan evaluasi pada berbagai karakteristik slurry diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pemisahan dan memperluas penerapan sistem pada skala laboratorium maupun pilot plant.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan penelitian internal yang dilaksanakan di Politeknik Industri Logam Morowali dengan skema pengerjaan multi disiplin ilmu. Dana penelitian diperoleh dari UPPM yang dibebankan pada DIPA Politeknik Industri Logam Morowali. Peneliti mengucapkan Terimakasih kepada semua pihak yang terlibat dalam penelitian tersebut

REFERENSI

- [1] S. Kaya and Y.A. Topkaya, "High pressure acid leaching of a refractory lateritic nickel ore," *Miner. Eng.*, vol. 24, pp. 11888–1197, 2011.
- [2] Kevin Cleary Wanta, Felisha Hapsari Tanujaya, Ratna Firda Susanti, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Indra Perdana, and Widya Astuti, "Studi Kinetika Proses Atmospheric Pressure Acid Leaching Biji Laterit Limonit Menggunakan Larutan Asam Nitrat Konsentrasi Rendah," *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 12, pp. 19–26, 2018.
- [3] Ahmad Abbasi Gharaei, Bahram Rezai, and Hadi Hamidian-Shormasti, "Environmental Friendly Approach: Atmospheric and High-Pressure Acid Leaching Studies, Low-Grade Laterites Nickel Processing," *Journal of Mining and Environment (JME)*, vol. 15, pp. 1591–1606, Jul. 2024.
- [4] F. Bahfie, A. Manaf, W. Astuti, F. Nurjaman, and U. Herlina, "Tinjauan teknologi proses ekstraksi bijih nikel laterit," *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, vol. 17, no. 3, pp. 135–152, Sep. 2021, doi: 10.30556/jtmb.Vol17.No3.2021.1156.
- [5] M. Afandy, Abdul Haris Mubarak, Muhammad Ikbil Rianto, and Syahril M, "LabVIEW- Based Leaching Tank Process Control System for Laterite Nickel Ore Processing on a Lab-Scale Basis," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, pp. 196–202, Dec. 2025, doi: 10.25077/jnte.v14n3.1239.2025.
- [6] C. Han, H. Xie, B. Bai, D. Liu, Y. Huang, and R. Zhang, "Study on the Factors Affecting the Performance of a Pressure Filtration–Flocculation–Solidification Combined Method for Mud Slurry Treatment," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 20, p. 11299, Oct. 2023, doi: 10.3390/app132011299.
- [7] S. Li, Y. Gao, R. Zhang, and Z. Zhao, "Study on the Consolidation Characteristics of Slurry-like Mud Treated by Flocculation–Solidification–High-Pressure Filtration Combined Method," *Materials*, vol. 17, no. 20, p. 4992, Oct. 2024, doi: 10.3390/ma17204992.
- [8] Dennis Teutscher, Tyll Weber-Carstanjen, Stephan Simonis, and Mathias J. Krause, "Predicting Filter Medium Performances in Chamber Filter Presses with Digital Twins Using Neural Network Technologies," *Preprint submitted to Computers & Chemical Engineering Journal*, vol. 21, 2025.
- [9] A. Messina, N. I. Giannoccaro, and A. Gentile, "Experimenting and modelling the dynamics of pneumatic actuators controlled by the pulse width modulation (PWM) technique," *Mechatronics*, vol. 15, no. 7, pp. 859–881, Sep. 2005, doi: 10.1016/j.mechatronics.2005.01.003.
- [10] F. Bahfie, A. Manaf, W. Astuti, F. Nurjaman, E. Prastyo, and U. Herlina, "Development of laterite ore processing and its applications," *Indonesian Mining Journal*, vol. 25, no. 2, pp. 89–104, Dec. 2022, doi: 10.30556/imj.Vol25.No2.2022.1261.
- [11] Moh . Afandy, Muhammad Ikbil Rianto, and Abdul Haris Mubarak, "Implementation of DC Motor Driver in Autoclave Reactor in Nickel Laterite Ore Processing," vol. 7, no. 2, pp. 237–242, Jul. 2025.
- [12] W. Wojtkowski and R. Kociszewski, "Pulse-Width Modulation Approaches for Efficient Harmonic Suppression," *Electronics (Basel)*, vol. 14, no. 13, p. 2651, Jun. 2025, doi: 10.3390/electronics14132651.
- [13] S. Cajetinac, D. Seslija, S. Aleksandrov, and M. Todorovic, "PWM Control and Identification of Frequency Characteristics of a Pneumatic Actuator using PLC Controller," *Elektronika ir Elektrotehnika*, vol. 123, no. 7, pp. 21–26, Sep. 2012, doi: 10.5755/j01.eee.123.7.2369.
- [14] S. Joseph-Soly, A. Nosrati, and J. Addai-Mensah, "Improved dewatering of nickel laterite ore slurries using superabsorbent polymers," *Advanced Powder Technology*, vol. 27, no. 6, pp. 2308–2316, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.appt.2016.07.010.
- [15] I. Townsend, "Automatic pressure filtration in mining and metallurgy," *Miner. Eng.*, vol. 16, no. 2, pp. 165–173, Feb. 2003, doi: 10.1016/S0892-6875(02)00266-2.
- [16] J. Palmer, "Operational results and future trends of filtration technology in minerals processing," 2015, pp. 67–79. doi: 10.36487/ACG_rep/1504_03_Palmer.
- [17] I. Asnawi, M. Sampeangin, E. A. P. Putra, Moh. Afandy, and H. Lilih Wijayanto, "Evaluasi Proses Filtrasi Pada Alat Vertical Pressure Filter Hidrolik Untuk Pemisahan Padat-Cair Ekstrak Nikel," *Jurnal Teknik Kimia*, vol. 20, no. 2, pp. 134–146, Jan. 2026, doi: 10.33005/jurnaltekkim.v20i2.57.
- [18] I. Asnawi *et al.*, "Rancang Bangun Alat Vertical Pressure Filter Berbasis Hidrolik untuk Proses Pemisahan Padatan Cairan Hasil Ekstraksi Bijih Nikel," *JURNAL CRANKSHAFT*, vol. 8, no. 2, pp. 50–58, Jun. 2025, doi: 10.24176/cra.v8i2.15018.